

## 초소성변형특성에 미치는 소성변형량의 영향

권용남, 장영원

포항공과대학교 항공재료연구센터(CAAM)  
포항시 남구 효자동 산 31번지, 790-784

### The Effect of Plastic Strain on the Superplastic Deformation Behavior

Yong Nam Kwon, Young Won Chang

Center for Advanced Aerospace Materials  
Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784

**Abstract** The effect of strain accumulation on the superplastic deformation behavior has been investigated through a series of load relaxation tests. The experimental results were analyzed using the recently proposed inelastic constitutive theory. The superplastic deformation of fine grained materials is confirmed to consist of grain boundary sliding and accommodating grain matrix deformation. However the flow behavior is changed with the plastic strain. It is believed that the microstructural changes such as grain growth and cavitation affect the superplastic deformation behaviors.

**Key Word** superplastic deformation, grain boundary sliding, grain growth

#### 1. 서론

초소성성형법을 이용한 부품의 생산시 공정변수를 효과적으로 제어하기 위해 다양한 모델을 통한 공정해석이 이루어지고 있다.[1,2] 이러한 초소성공정해석시 재료의 소성변형거동을 정확하게 표현해 주는 물성값들이 필수적으로 요구된다. 현재까지 진행된 초소성성형공정연구에서 사용된 구성방정식은 경험적인 **power law equation**으로 초소성변형을 정상상태로 가정하여 표현하고 있다. 따라서 변형량 축적에 따른 변형거동의 변화를 정확하게 표현해 줄 수 없다. 하지만 초소성재료의 인장시험시 뚜렷한 가공경화를 관찰할 수 있다. 이는 초소성재료의 고온변형시 발생하는 변형유기결정립성장(**strain induced grain growth**)때문에 나타나는 것으로 생각된다. 또한 변형이 진행됨에 따라 석출물의 분포에 따라 결정립계의 성질 및 이에 따른 결정립계미끄러짐의 특성도 변화할 것으로 생각된다. 따라서 보다 정확한 공정해석을 위해서는 변형에 따른 미세조직의 변화를 정확하게 표현해 줄 수 있는 구성방정식이 필수적이다.

본 연구에서는 변형량이 증가함에 따른 초소성변형거동의 변화를 조사하기 위하여 응력이완시험과 이에 따른 미세조직분석을 실시하였다. 응력시험결과는 최근 제안된 고온변형이론에 따라 결정립계미끄러짐의 영향과 전위슬립에 의한 결정립내변형으로 나누어 정량적인 분석을 실시하였다. 변형중 발생하는 여러가지 미세조직적 변화를 고려하여 결정된 재료의 유동특성은 실제 성형공정을 보다 정확하게 표현해 줄 수 있을 것으로 생각된다.

#### 2. 실험방법

본 연구에 사용한 재료는 7075Al 합금으로 화학적 조성은 표 1 과 같다. 초소성특성을 나타내는 미세한 결정립을 얻기 위하여 가공열처리를 실시하였다.

Table 1. The chemical composition of 7075Al (wt%)

Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Al
5.76	1.96	1.61	0.22	0.04	0.19	bal.

변형량이 초소성변형특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 변형량을 증가시키면서 응력이완시험을 실시하였다. 초소성재료의 변형특성을 조사하기 위하여 일반적으로 사용되는 변형율속도변환시험에 비해 응력이완시험은 단위시험도중 소성변형량이 매우 작아 재료의 내부상태가 거의 일정하게 유지되는 장점을 가지고 있다. 변형에

따른 미세조직의 변화는 광학현미경과 투과전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 1은 515°C에서 변형량증가에 따른 유동곡선의 변화를 보여주고 있다. 변형량이 증가함에 따라 유동곡선들은 높은 응력구역쪽으로 이동함을 알 수 있다. 2%정도의 변형량 조건에서 얻은 유동곡선은 이전 연구결과에서 확인할 수 있었던 결정립계미끄러짐과 이를 보완해주는 결정립내변형으로 구성되어 있다.[3] 즉 전체 변형은 식 (1)과 같이 결정립계미끄러짐에 의한 변형(2)과 전위슬립에 의한 소성변형(3)으로 이루어져 있음을 확인할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\alpha} + \dot{g} \quad (1)$$

$$(\dot{g} / \dot{g}_0) = (\sigma / \Sigma_g - 1)^{1/M_g} \quad (2)$$

$$(\sigma^* / \sigma^1) = \exp(\dot{\alpha}^* / \dot{\alpha})^p \quad (3)$$

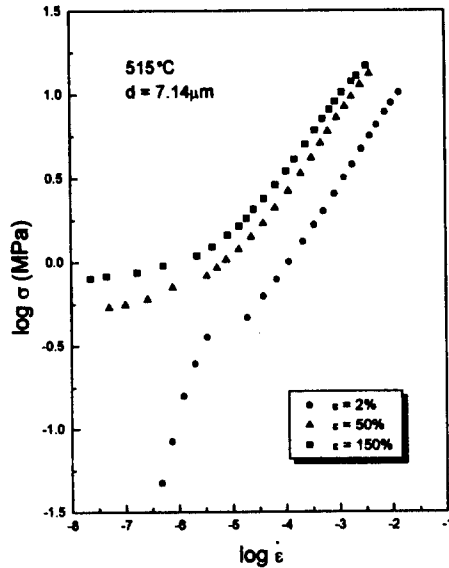


Fig. 1. The flow curves of 7075Al with the accumulation of strain at 515°C

하지만, 변형량이 증가함에 따라 유동곡선의 모양은 초기에 실시한 응력이완결과와 크게 달라진다. 낮은 변형량의 경우 낮은 응력구역에서 관찰할 수 있었던 전위슬립에 의한 소성변형의 효과는 변형량이 증가함에 따라 더 이상 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. 결국 변형량의 증가는 단순히 결정립성장을 통한 유동응력의 증가만을 가져오는 것이 아니라 변형특성에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 변형량이 작은 초기의 응력이완시험중 변형은 결정립계미끄러짐과 이를 보완해주는 전위슬립이 이상적으로 일어나고 있다고 생각된다. 하지만 변형율을 증가시키기 위해 실시한 인장시험시 응력이완시험때와는 달리 변형이 강제적으로 진행되어 결정립내변형이 완벽하게 결정립계미끄러짐을 보완해주지 못할 것으로 생각된다. 결과적으로 재료내부에는 변형율 증가에 따라 결정립성장과 공공의 발생등의 미세조직의 변화를 가지게 된다. 결정립계미끄러짐 특성의 변화는 식(2)에 정의된 재료상수  $\dot{g}_0, \Sigma_g, M_g$  값으로 표현된다. 변형율이 낮은 초기의 응력이완 결과에서 얻은  $M_g$  값은 1.0으로 결정립계미끄러짐이 이상적인 뉴턴점성운동으로 표현되어지는데 반해 변형량이 증가한 경우

$M_g$  값은 1.0 보다 낮은 값을 보여주고 있다.  $M_g$  값은 결정립계의 구조에 따라 변화하는 것으로 생각되어지는데 변형량이 증가함에 따라 석출물 분포의 변화 및 결정립계에 전위들의 집적과 관련이 있을 것으로 판단된다.  $\Sigma_g$  값은 결정립계미끄러짐의 임계응력으로 변형량에 따라 증가한다. 초소성변형의 임계응력에 관한 연구는 연구자들에 따라 다른 설명을 하고 있다. 즉 초소성변형을 세개의 변형구역으로 나누어서 설명할 때 구역 I에서의 낮은 변형율속도의 원인으로 구역 I과 II는 서로 다른 변형기구라는 주장과 긴 시험시간으로 인한 결정립성장에 기인한다는 주장이 제안되었으며 다른 연구결과에서는 구역 I과 II이 서로 같은 변형기구에 의해 지배된다고 설명되었다.[4,5,6] 본 연구에 의하면 결정립계미끄러짐의 임계응력은 초소성변형의 고유한 특성으로 결정립계의 특성에 의존함을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

초소성변형은 결정립계미끄러짐과 전위운동에 의해 이를 보완해주는 결정립내변형으로 이루어져 있음을 확인할 수 있었다. 또한 변형량이 증가함에 따라 재료내부의 미세조직이 변화하며 그 결과로 결정립계미끄러짐의 특성이 달라짐을 정량적으로 평가하였다. 위의 실험에서 얻은 재료물성치를 이용하여 인장시험을 수치모사하였으며 단순한 power law equation에 따른 해석결과와 비교하였을 때 보다 실제 실험결과에 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

1. X.D.Ding, H.M.Abib, C.H.Hamilton and A.E.Bayoumi, 1997, Trans. ASME, Vol 119, 26
2. N.Chandra and S.C.Rama, 1992, Trans. ASME, Vol 114, 452
3. 권용남, 장영원, 1994, 대한금속학회지, Vol. 32, 878
4. F.A.Mohamed and T.G.Langdon, 1975, Acta Metall., Vol.23, 117
5. G.Rai and N.J.Grant, 1975, Metall.Trans., Vol. 6A, 385
6. B.Burton, 1971, Scripta Metall., Vol.5, 669